

УДК 621.39

Передавання гармонічних сигналів через структуру із паралельних провідників

Вовчук Д. А.¹, Робулець П. Ф.²

¹Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

²Чернівецька філія ПАТ "Укртелеком"

E-mail: dimavovchuk@gmail.com

Робота присвячена дослідженню структури із паралельних провідників (СПП) для пристроїв передавання гармонічних сигналів. СПП є одним із класів метаматеріалів, що характеризується від'ємним значенням діелектричної проникності. Пристрої, в основу яких входять провідникові метаструктури, знаходять своє застосування при передаванні зображень, енергії сигналів, зондуванні тощо. В роботі проведено аналіз можливості функціонування СПП у широкому діапазоні частот, що дозволяє покращити процес передавання електромагнітних (ЕМ) хвиль між двома хвилевідними портами, що розміщені один навпроти одного із повітряним проміжком між їх апертурами, заповненим СПП. Рівномірний розподіл функції передавання у широкому діапазоні частот дозволяє вивчати можливість передавання гармонічних сигналів, де комірки (область між чотирма сусідніми провідниками) можуть розглядатись як окремі пікселі зображення. Дослідження розподілу електричного поля показали, що мінімальний період розміщення диполів на передавальній стороні повинен становити $2a$ вздовж осі x та $3a$ вздовж осі y для того, щоб гармонічні сигнали кожного з них можна було чітко розпізнати на приймальній стороні. Вивчення спектральних характеристик сигналів, отриманих на приймальній стороні, показало, що частка енергії, яка фіксується розміщеними у сусідніх комірках із кроком $2a$ та $3a$ диполями є на порядок меншими, ніж частка енергії, що фіксується диполем необхідної комірки. Частка енергії гармонічних сигналів, отриманих розміщеними по діагоналі диполями на приймальній стороні, є на декілька порядків меншою. Таким чином, встановлено, що крок розміщення дипольних випромінювачів на приймальній та передавальній стороні повинен становити не менше, ніж $2a$. Результати даної роботи можуть стати корисними у подальших дослідженнях систем передавання зображень, ендоскопії, зондування з використанням провідникових метаструктур.

Ключові слова: метаматеріали; структура із паралельних провідників; передавання зображень; розподіл електричного поля; спектральний аналіз

DOI: [10.20535/RADAP.2018.75.9-15](https://doi.org/10.20535/RADAP.2018.75.9-15)

Вступ

Метаматеріали є одним із найбільш перспективних видів штучних матеріалів, що забезпечуються їх незвичайними та унікальними властивостями. Ці властивості визначаються від'ємними значеннями діелектричної та/або магнітної проникностей [1, 2]. Таке явище є можливим через забезпечення необхідних параметрів складових елементів матеріалу чи структури. Матеріали, що володіють такими характеристиками, можуть знайти широкий спектр застосувань, таких як модифікації антен, передавання зображень та ЕМ енергії, поглиначі, рефлектори та багато інших [3–6].

Одним із класів метаматеріалів є провідникові метаматеріали, що представляють собою дво- та трирозмірний масив металевих провідників, розміщених у діелектричній матриці [1, 7]. Одним із видів провідникових метаматеріалів є СПП, загальний вигляд якої приведений на рис. 1.

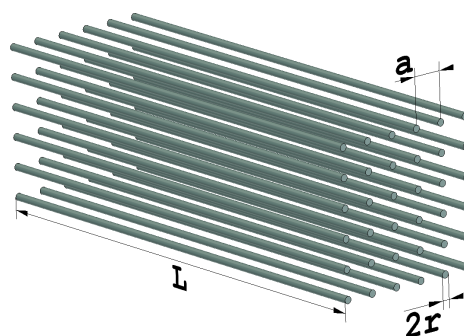


Рис. 1. Метаструктура, що складається із паралельних металевих провідників довжиною L та діаметром $2r$, із періодом їх розташування a .

Структура складається із провідників довжиною L та діаметром $2r$, відстань між якими становить a . Для спрощення моделі у якості діелектрика може використовуватись вакуум. Така структура є ϵ -негативним метаматеріалом при умові $a \ll \lambda$,

де λ – довжина хвилі, що відповідає резонансній частоті (частоті резонансу Фабрі-Перо).

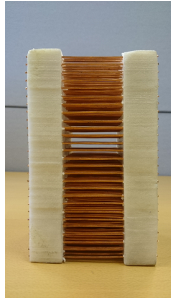


Рис. 2. Експериментальний зразок СПП, що складається із масиву 27 на 13 мідних провідників $L = 100$ мм, $r = 0,75$ мм та $a = 6$ мм.

1 Широко смугове передавання енергії ЕМ хвиль через СПП

Перш за все, СПП є широковідомі як суперлінзи для передавання зображень чи випромінювання ЕМ хвиль [8]. Проте, їх використання є доцільним тільки на частотах резонансів Фабрі-Перо, що значно обмежує спектр застосувань структури. Проте, нещодавно була доведена можливість широко смугового передавання енергії ЕМ хвиль [9,10]. Головна ідея полягала в тому, що джерело сигналів безконтактно розміщувалось всередині структури між сусідніми провідниками або щонайменше на одній площині із кінцями провідників (на площині інтерфейсу СПП) [9]. Це дозволяло забезпечити ближньо-польову взаємодію між джерелом сигналів та провідниками структури, затушення можливих резонансів та відповідне розширення смуги робочих частот. Для того, щоб реалізувати таку концепцію, було розроблено модель, що складалася із двох хвильоводів, які виконували роль джерела та приймальної сторони, із повітряним проміжком довжиною l між їх апертурами, а також сконструйовано СПП, параметри якої становили $L = 100$ мм, $r = 0,75$ мм та $a = 6$ мм (рис. 2). Розміри СПП відповідали розмірам апертури хвильоводів, а її довжина становила $L = a + l$. СПП розміщувалась між двома хвильоводами та вмонтовувалась у кожен із портів на глибину $a/2$ (рис. 3).

Результати, що були отримані у роботах [9,10], доводять широко смуговий ефект покращення передавання енергії ЕМ хвиль у 2,5-3 рази від середнього $-4,3$ дБ до $-0,25$ дБ у частотному діапазоні від 1 до 2 ГГц. В загальному, у роботі [9] показано, що покращення проявляється у діапазоні значно ширшому, ніж на приведених графіках, проте у даній роботі зосередимось на результатах, отриманих для діапазону частот від 1 до 2 ГГц, оскільки він відповідає одномодовому режиму роботи використовуваних хвильоводів.

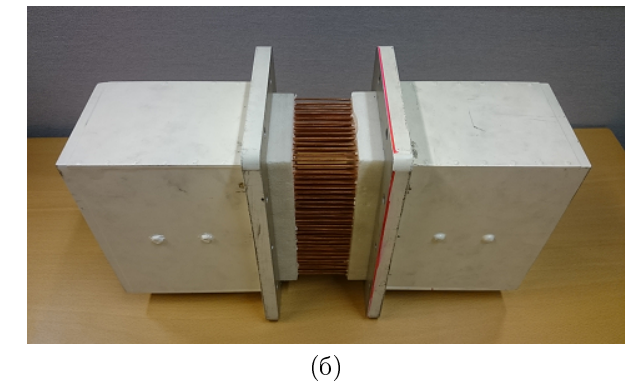
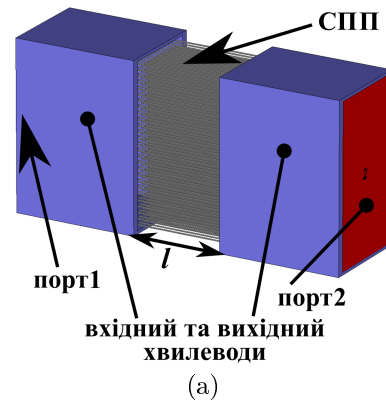


Рис. 3. Модель (а) та експериментальна установка (б) системи, що складається із двох прямокутних металевих хвильоводів розмірами апертури 164 на 82 мм. Хвильоводи розміщені один навпроти одного на відстані $l = 90$ мм. СПП вмонтована у кожен із хвильоводів на глибину $a/2$

2 Аналіз розподілу електричного поля

Дослідження у [11] показали, що сигнали, які проходять через СПП, не піддаються нелінійним спотворенням. Якщо джерелом сигналів та їх приймачем є хвильовідні порти, то поперечне електричне поле рівномірно розподілене по всій поперечній площині структури. В такому випадку можливе передавання сигналів, генерованих тільки одним джерелом. Проте, використовуючи, наприклад, симетричний диполь як джерело сигналів та розмістивши його між чотирма сусідніми провідниками, електричне поле буде сконцентроване в основному між провідниками та частково в їх околі [12]. Дослідження розподілу електричного поля за умови випромінювання диполем дасть можливість використання такої структури для передавання зображень, де кожен піксель може задаватись ЕМ хвилею із тим самим чи різним значеннями частот; або для вирішення задач телекомунікацій при передаванні одночасно декількох сигналів через один і той же напрямний пристрій.

Для дослідження впливу взаємного розміщення диполів на розподіли електричних полів на

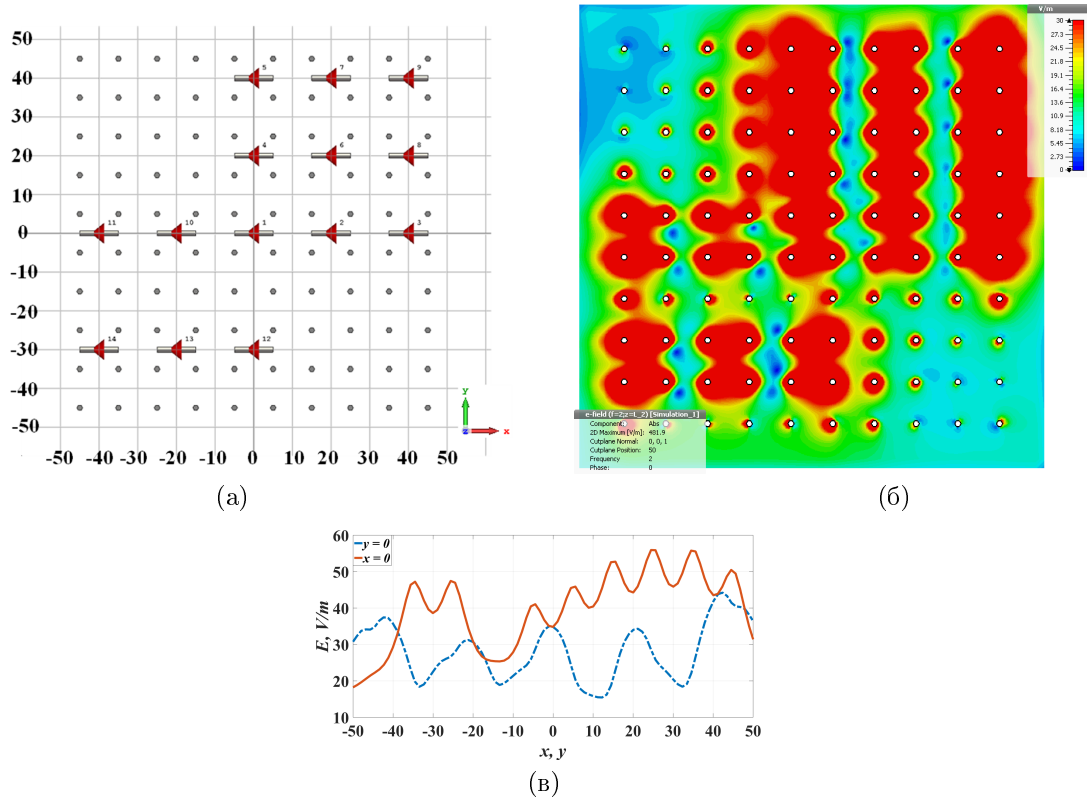


Рис. 4. CST модель для дослідження роздільної здатності передавання сигналів, що показує розміщення дипольних випромінювачів із кроком $2a$ і $3a$ (а), кольорова мапа розподілу електричного поля на приймальній стороні (б) та розподіл електричного поля $E(x)$ при $y = 0$ і $E(y)$ при $x = 0$ (в)

приймальній стороні, у середовищі моделювання CSTStudioSuite було спроектовано модель метаструктури, що складається із 10 на 10 металевих провідників довжиною 100 мм та їх періодом розташування 10 мм. Чотирнадцять диполів розміщено у одній площині із кінцями провідників передавальної сторони із періодом $2a$ та $3a$ так, як показано на рис. 4а. Таке розміщення диполів дозволяє оцінити вплив полів сусідніх диполів, що відображаються за допомогою кольорової мапи рис. 4б, а також рис. 4в, де показано розподіл електричного поля вздовж осей координат x та y при $y = 0$ (синя штрих-пунктирна крива) та $x = 0$ (червона суцільна крива), відповідно. Якщо взаємодія між сигналами, що випромінюються сусідніми джерелами, не є важливою, тоді період розташування диполів як у правій верхній частині інтерфейсу СПП (рис. 4а) є допустимим.

Проте, для чіткого розмежування максимумів розподілу електричного поля, необхідно забезпечити розташування диполів із періодом $3a$ вздовж двох напрямків x та y , як приведено на рис. 5а. Незважаючи на те, що залежність $E(x)$ при $y = 0$ на рис. 4в має виражені максимуми, але різниця між максимумами та мінімумами може бути недостатньою. Розподіл електричного поля E , що приведений у вигляді кольорової мапи на рис. 5б, та залежності $E(x)$ при $y = 0$ і $E(y)$ при $x = 0$

рис. 5в демонструють чітке розрізнення кожного із сигналів, що передаються.

На рис. 6 приведені розподіли електричних полів при розташуванні диполів із кроком $2a$ вздовж осі x (при $y = 0$) згідно моделі приведеної на рис. 4а, та із кроком $3a$ вздовж осі y (при $x = 0$) – згідно моделі приведеної на рис. 5а. Розподіли явно показують, що передавання є ефективним навіть якщо довжина структури не є спів-кратною довжині пів-хвилі ЕМ сигналу, що головним чином є підтвердженням результатів у [10]. Рис. 6а показує, що дипольні випромінювачі можуть бути розміщені із кроком $2a$, оскільки основна частина енергії ЕМ сигналів кожного диполя зосереджена між сусідніми провідниками СПП.

3 Спектральний аналіз сигналів

Для дослідження можливості передавання сигналів різної частоти одночасно через СПП, на приймальній стороні на одній площині із заднім інтерфейсом СПП розміщено чотирнадцять диполів у такому ж порядку як і у моделі, приведеної на рис. 4а. На передавальній стороні на одній площині із переднім інтерфейсом СПП з координатами $(x, y) = (0, 0)$ розміщено один передавальний диполь. У процесі моделювання для живлення дис-

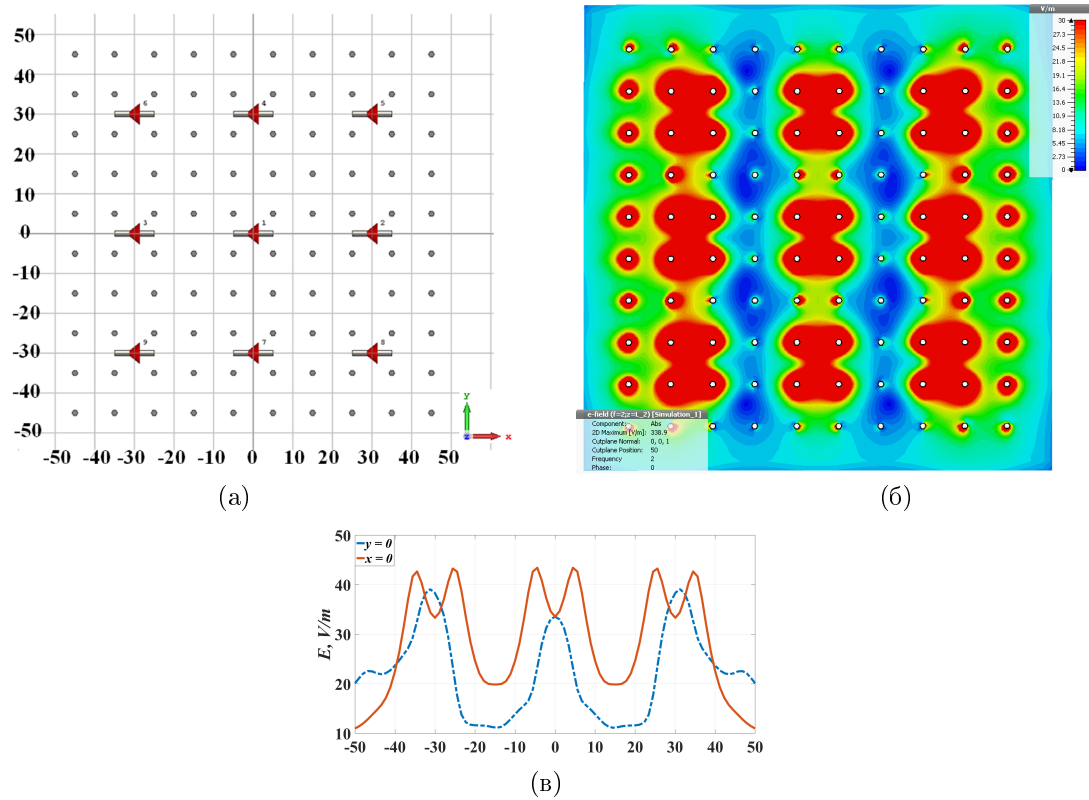


Рис. 5. *CST* модель для дослідження роздільної здатності передавання сигналів, що показує розміщення дипольних випромінювачів із кроком $3a$ вздовж двох координат вхідного інтерфейсу СПП (а), кольорова мапа розподілу електричного поля на приймальній стороні (б) та розподіл електричного поля $E(x)$ при $y = 0$ і $E(y)$ при $x = 0$ (в)

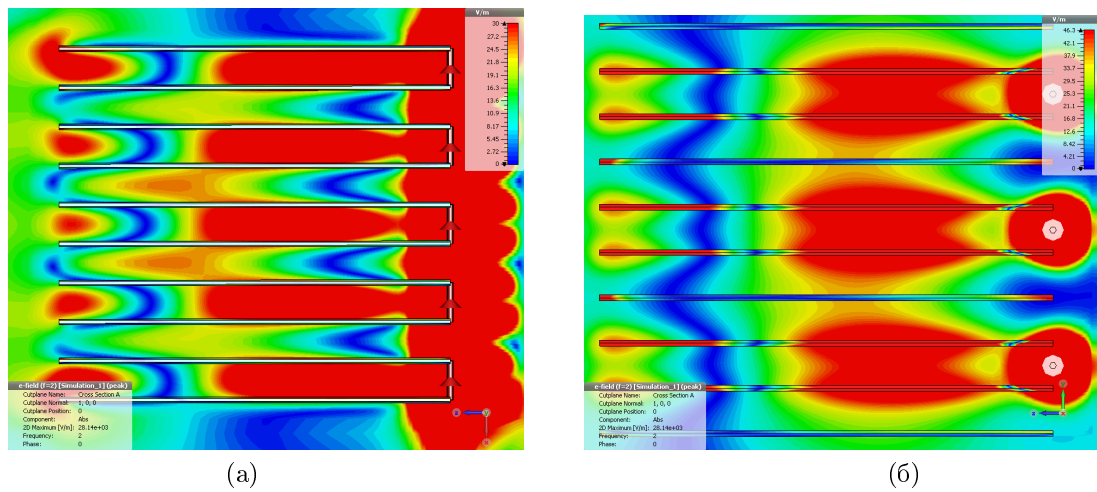


Рис. 6. Розподіл електричного поля із кроком розташованих дипольних випромінювачів $2a$ у площині xz при $y = 0$ (а) та з кроком $3a$ у площині yz при $x = 0$ (б)

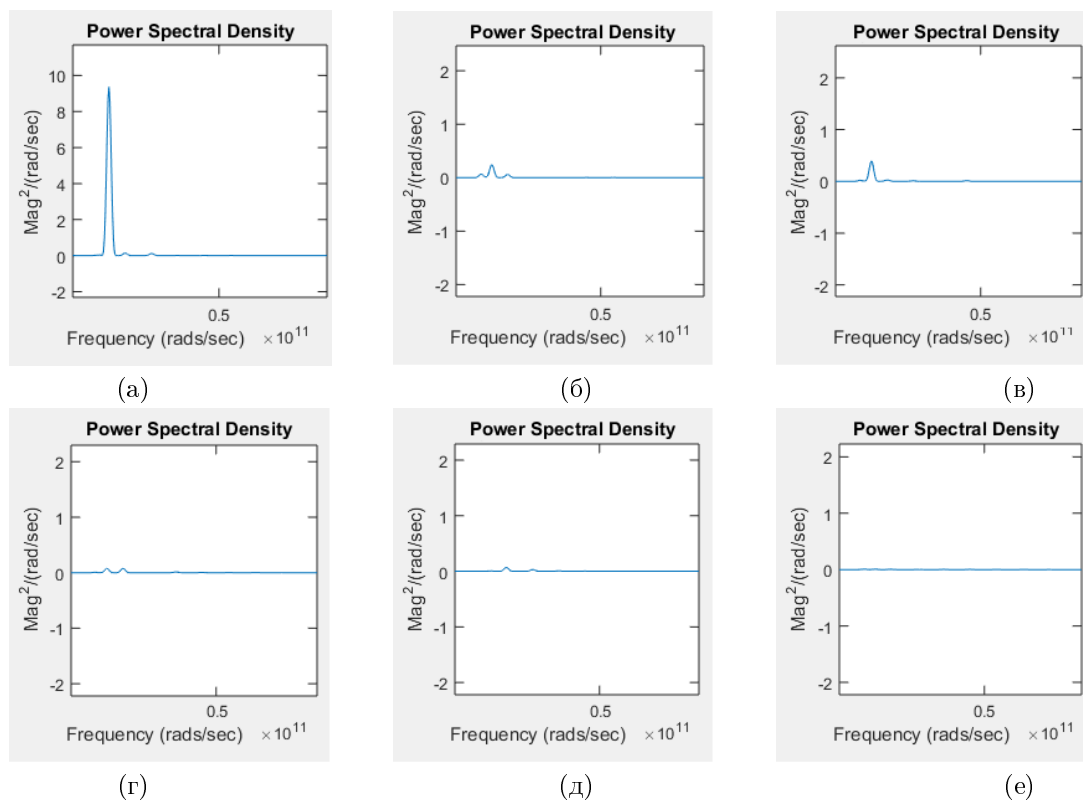


Рис. 7. Спектральні характеристики потужностей сигналів, прийнятих диполями приймальної сторони, розміщеними навпроти диполя, що випромінює – центральний диполь (а), із кроком $2a$ вздовж осі x (б) і y (в), із кроком $3a$ вздовж осі y (г), а також по діагоналі із кроком $2a$ (д) та $3a$ (е)

кретного порту диполя, що випромінює, використовувався гармонічний сигнал із заданим значенням частоти, що становила 2 ГГц. Відповідно, на приймальній стороні один із диполів розміщувався безпосередньо навпроти диполя передавальної сторони (центрального диполя), а решта приймальних диполів розміщені на відстанях $2a$ та $3a$ вздовж двох осей координат x і y та по діагоналі.

Шляхом комп'ютерного моделювання було необхідно переконатись чи дійсно структура не вносить нелінійних спотворень під час передавання через неї гармонічного коливання від диполя передавальної сторони до розташованого навпроти диполя приймальної сторони, а також визначити задовільний період розташування диполів та взаємний вплив на процеси приймання гармонічних сигналів сусідніх диполів.

Як зазначалось вище, моделювання проводились у CST Studio Suite. Отримані результати імпортувались у середовище MatLab & Simulink, де за допомогою відповідної моделі проводився аналіз спектрів потужностей сигналів, прийнятих диполями приймальної сторони. На рис. 7а приведені результати спектрального аналізу прийнятого гармонічного сигналу центральним диполем приймальної сторони. Видно, що гармонічний сигнал передається без спотворень, оскільки спостерігається тільки одна спектральна складова, та може бути чітко детектований на приймальній стороні за до-

помогою відповідного диполя. При цьому дипольні приймачі, що розміщені на відстанях $2a$ вздовж осей координат x та y від приймального центрального диполя, також отримують певну частку енергії (рис. 7б, в). Проте, ця частка набагато менша, в порівнянні із часткою енергії, що приймається центральним диполем, та може бути знехтувана. Тому, в цілому можна твердити, що розташування диполів із кроком $2a$ є цілком задовільним.

Для повної картини також проаналізовано сигнали, отримані диполями приймальної сторони, що розташовані на відстані $3a$ по осі x від центрального приймального диполя (рис. 7г), а також диполів, розташованих по діагоналі від центрального приймального диполя на відстані $2a$ та $3a$ (рис. 7д, е). Спектральні характеристики показують, що частка енергії, що прийнята цими диполями, є незначною та може бути знехтувана.

Висновки

У роботі показано можливість піксельного передавання сигналів, а саме по паралельних комірках СПП, що базується на ефекті ширококутового передавання енергії ЕМ сигналів, вперше приведеного в роботі [9]. СПП дозволяє покращити процес передавання ЕМ сигналів у широкому діапазоні частот, якщо джерело сигналів розміщене безконтактно між будь-якими чотирьома сусідніми провідниками

безпосередньо у структурі або щонайменше на одній площині із інтерфейсом СПП. У такому випадку можна зробити припущення, що сигнали різної частоти можуть передаватись, використовуючи одну і ту ж СПП.

Дослідження розподілів електричних полів показує, що диполі варто розташовувати із періодом $2a$ у випадку колінеарного розташування диполів між собою та $3a$ – якщо диполі розміщені паралельно. Таке розміщення диполів дає можливість розпізнавання кожного із пікселів зображення. Зменшення періоду унеможливорює розпізнавання сигналів сусідніх комірок.

Спектральний аналіз при передаванні гармонічного синусоїдального сигналу показав, що розміщення диполів навіть із кроком $2a$ є задовільним, оскільки у спектрах прийнятих сигналів спостерігається тільки одна достатньо виражена складова. Частка енергії, яку складають гармоніки спектру сусідніх диполів приймаючої сторони, є на порядок меншою.

Таким чином, СПП може знайти своє застосування при передаванні зображень із роздільною здатністю, що становить $2a$. Згідно із тим, що СПП може функціонувати у широкому діапазоні частот, при відповідному розміщенні джерел випромінювання ЕМ хвиль, уможливорюється передавання гармонічних сигналів із різними значеннями частот по паралельних комірках. Отримані в статті результати розширюють спектр можливих застосувань СПП, не тільки під час передавання зображень, а і для розвитку телекомунікаційних провідних систем.

References

- [1] Capolino F. (2009) *Theory and Phenomena of Metamaterials*. DOI: 10.1201/9781420054262
- [2] Sihvola A. (2007) Metamaterials in electromagnetics. *Metamaterials*, Vol. 1, Iss. 1, pp. 2-11. DOI: 10.1016/j.metmat.2007.02.003
- [3] Ziolkowski R.W. and Erentok A. (2006) Metamaterial-based efficient electrically small antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 54, Iss. 7, pp. 2113-2130. DOI: 10.1109/tap.2006.877179
- [4] Chen H., Padilla W.J., Zide J.M.O., Gossard A.C., Taylor A.J. and Averitt R.D. (2006) Active terahertz metamaterial devices. *Nature*, Vol. 444, Iss. 7119, pp. 597-600. DOI: 10.1038/nature05343
- [5] Wu B., Wang W., Pacheco J., Chen X., Grzegorzczak T.M. and Kong J.A. (2005) A Study of Using Metamaterials as Antenna Substrate to Enhance Gain. *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 51, pp. 295-328. DOI: 10.2528/pier04070701
- [6] Zheludev N.I. and Kivshar Y.S. (2012) From metamaterials to metadevices. *Nature Materials*, Vol. 11, Iss. 11, pp. 917-924. DOI: 10.1038/nmat3431
- [7] Belov P., Tretyakov S. and Viitanen A. (2002) Dispersion and Reflection Properties of Artificial Media Formed By Regular Lattices of Ideally Conducting Wires. *Journal of*

Electromagnetic Waves and Applications, Vol. 16, Iss. 8, pp. 1153-1170. DOI: 10.1163/156939302x00688

- [8] Simovski C.R., Belov P.A., Atrashchenko A.V. and Kivshar Y.S. (2012) Wire Metamaterials: Physics and Applications. *Advanced Materials*, Vol. 24, Iss. 31, pp. 4229-4248. DOI: 10.1002/adma.201200931
- [9] Vovchuk D., Kosulnikov S., Nefedov I.S., Tretyakov S.A. and Simovski C. (2015) Multi-Mode Broadband Power Transfer Through a Wire Medium Slab (Invited Paper). *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 154, pp. 171-180. DOI: 10.2528/pier15111908
- [10] Kosulnikov S., Vovchuk D., Nefedov I., Tretyakov S. and Simovski C. (2016) Broadband power transfer through a metallic wire medium slab. *2016 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS)*, pp. 596-599. DOI: 10.1109/ursi-emts.2016.7571463
- [11] Vovchuk D., Haliuk S. and Politsansky L. (2018) Distortionless Signals Transfer Through a Wire Media Metastucture. *Informatics Control Measurement in Economy and Environment Protection*, Vol. 8, Iss. 1, pp. 44-47. DOI: 10.5604/01.3001.0010.8646
- [12] Markov A. and Skorobogatiy M. (2013) Two-wire terahertz fibers with porous dielectric support. *Optics Express*, Vol. 21, Iss. 10, pp. 12728. DOI: 10.1364/oe.21.012728

Передача гармонических сигналов через среду из параллельных проводников

Вовчук Д. А., Робулець П. Ф.

В работе исследуется среда из параллельных проводников с целью использования для устройств передачи сигналов. К таким техническим устройствам относятся средства передачи изображений, энергии сигналов или сами сигналы и другие. В данной работе была подтверждена возможность широкополосной передачи энергии затухающих электромагнитных волн, а уровень улучшения в диапазоне частот от 1 до 2 ГГц в среднем составил 2,5-3 раза. Также изучена возможность пиксельной передачи сигналов и показано, что это позволяет использование таких структур в дальнейшем как многоканальной системы телекоммуникаций. Исследована форма распространяющейся волны путем спектрального анализа и показано, что среда из проводников не вносит никаких нелинейных искажений. Показано, что использование данной среды может обеспечить связь между портами взаимодействия. Так же спектральный анализ дал возможность оценить необходимый период расположения диполей на обоих интерфейсах среды для возможности распознавания сигналов на приемной стороне.

Ключевые слова: метаматериалы; среда из параллельных проводов; передача изображений; распределение электрического поля; спектральный анализ

Transmission of Harmonic Signals Through a Wire Media

Vovchuk D. A., Robulets P. F.

This paper is devoted to wire media (WM) investigation for signal transfer devices. Such devices are promising for different applications as imaging, power or signal transfer, sensing etc. However, first WMs could be used as a resonance structures, because the transfer of electromagnetic (EM) waves was possible only at the Fabry-Perot frequencies. It restricts the number of applications. However, the last works has shown the possibility of the broadband power transfer of evanescent electromagnetic waves. It allows using the same source of EM waves and their receiver to transfer the signals with different values of operation frequencies. Another investigation has proved that the WM does not distort the propagation wave. It allowed to suppose the possibility of pixel signal transfer that was studied in the paper and shown the ability of application of the such structures as the multichannel communi-

cation systems. With this aim the signals sources were allocated at the same plane with the input WM interface. First of all, the simulation investigations of the electric field distributions of transferred harmonic signals through the WM have shown the needed period of dipoles allocations for the satisfactory resolution of received harmonic signals. One more conclusion from obtained results is the improvement that in this case the WM is not the resonance structure, but the same one operates with the signals of different frequencies. More detailed results and understanding of this were obtained from the spectrum analysis of the signals received at the output interface. It shown that the period of sources 2a is acceptable along x, y and diagonal directions. The spectrum analysis of the shape of the propagation wave also demonstrated and proven that the propagating signals do not suffer any nonlinear distortions. In the case of using of WM slab it can provide the excellent coupling between the interaction ports.

Key words: metamaterials; wire media; imaging; electrical field distribution; spectral analysis